基于 Pulser-sustainer 放电的高重复频率长脉冲 TE CO_2 激光器持续运转特性

卢远添 黄文武 钟艳红 刁伟伦 柯常军 吴谨*
（中国科学院电子学研究所，北京，100190）

摘要：研究了一台长脉冲紫外预电离 TE CO_2 激光器的长时间持续运转特性。激光器增益体积为 1.17L、采用 Pulser/sustainer 放电激励。在工作气体气压 30kPa、不采用固体催化剂的条件下，采用三种放电脉冲宽度(14.2us, 20.0us 和 24.5us) 和不同的注入能量，激光器分别连续不中断运转 30 分钟。详细记录了单脉冲放电时激光器的典型放电电压/电流波形和相应激光脉冲波形以及高重复频率工作时激光平均功率的实时变化曲线。数据显示，这种长脉冲 TE CO_2 激光器在不同放电脉冲宽度、不同注入能量、不同脉冲重复频率下均成功稳定运转 30 分钟，激光平均功率下降均小于 15%；同时，这种激光器在高重复频率运转时具备较好的"抗起弧"能力，偶尔的起弧放电不会雪崩发展至中断激光输出。研究结果表明，这种长脉冲 TE CO_2 激光器在高重复频率下具备良好持续运转能力。

关键词：激光技术；长脉冲 TE CO_2 激光器；Pulser/sustainer 放电；高重复频率

中图分类号 TN248. 2+2 **文献标识码** A

Durable Operation of High Repetition Rate Long Pulse TE CO_2 Laser with Pulser-sustainer Discharge

Lu Yuantian，Huang Wenwu，Zhong Yanhong, Diao Weilun，Ke Changjun，and Wu Jin*
（Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190）

Abstract: The durable performance of a high repetition rate long pulse UV-preionized TE CO_2 laser was investigated. The laser was excited by pulser-sustainer discharge with an active volume of 1.17Liters. With mixture pressure of 30kPa and no solid catalyst, the laser was uninterruptedly discharged for 30 minutes under three discharge pulse widths (14.2us, 20.0us and 24.5us) and various injection energies. Typical discharge voltage/current waveforms as well as the corresponding laser pulse profiles under single pulse operation, and the real-time variations of the average laser power under high repetition rate operation were obtained. Data showed that under all discharge pulse width, injection energy and different pulse repetition rate experimented, the laser successfully and stably operated 30 minutes, with less than 15% decrease in the laser average power. Experiments also discovered that the laser is highly resistive to arc discharge under high repetition rate operation, occasional arcing in the discharge did not avalanche to breakdown the laser output. The results demonstrated that the long pulse TE CO_2 laser possessed very sound durability under high repetition rate operation.

Keywords: Laser technique; long pulse TE CO_2 laser; pulser-sustainer discharge; high repetition rate

1 引言

脉冲 CO_2 激光器在非金属材料（如玻璃等）加工方面有重要应用，如二氧化硅玻璃制品的标记、修复、抛光和成型等[1-3]。其中，Q 调制 CO_2 激光器是最常用脉冲 CO_2 激光源。但是， Q 调制 CO_2 激光器一般输出平均功率低（≤50W）、脉冲宽度窄（几十 ns）、脉冲能量小，可实现的加工速度较慢。2014 年，德国 G.

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

Staupendahl 发展了一种新的 Q 调制 CO_2 激光器[4]，其输出平均功率超过 200W，脉冲宽度达到 300-400ns，大大提高了加工速度。除此之外，一种基于 Pulser-sustainer 技术的放电激励电路[7]的紫外预电离长脉冲 TE CO_2 激光器（以下简称"长脉冲 TE CO_2 激光器"）[5-12]，由于采用了特别的预电离技术[13]和放电电路设计[14]，可以在 5-50us 脉冲宽度范围内实现高平均功率运转；与 Q 调制脉冲 CO_2 激光器相比，这种长脉冲 TE CO_2 激光器输出平均功率更大、脉冲宽度更长、脉冲能量更高，也有望成为非金属材料 CO_2 激光加工的良好备选光源。

前期关于这种长脉冲 TE CO_2 激光器的研究主要聚焦于其基本运转特性，如放电稳定性[5-8]、可调谐特性[9]、大能量/高功率输出特性[10-11]等，很少报道其长时间连续可靠运转特性，更缺乏有价值的实验数据报道。这其实是激光加工等应用领域特别关注的一个重要问题。

本文对这种长脉冲 TE CO_2 激光器的长时间运转特性开展了实验研究。在不使用固体催化剂的条件下，详细研究了激光器在三种不同放电脉冲宽度（14.2us，20.0us，24.5us）下高重复频率连续运转长达 30 分钟的输出特性，首次演示了长脉冲 TE CO_2 激光器的持续工作能力，为其激光加工应用提供了定量可参考的试验数据。

2 激光器设计考虑

2.1 激光器基本设计

实验用的长脉冲 TE CO_2 激光器基本结构如文献[5-8]所述，主放电电极、预电离电极、热交换器、切向风机、导流风道等安装在一个直径 420mm 的密封不锈钢腔体内。主放电电极由一对均匀场面型电极组成，有效放电体积约 1.17L。激光气体混合气体比约为 CO_2:N_2:He=1:2.5:13（掺有少许 H_2 和 CO），总气压 30kPa。激光谐振腔采用"Z"形的折叠腔，全反端为 R=20m 的凹面铜镜，输出端是反射率为 50%的镀膜 ZnSe 凹镜,光路中间转折镜是铜制平面反射镜。整个谐振腔安装在由三根因瓦合金（殷钢）管支撑的光桥结构上。

长脉冲 TE CO_2 激光器的激励电路采用 Pulser/sustainer 放电电路，如图 1 所示[8]。 图 1 中，CCPS1 和 CCPS2 代表两台独立的高压电容充电电源，两个高压闸流管 V1 和 V2 充当高压放电开关，（Li、Ci，i=1，2，…，10）为十个电感和十个电容构成的脉冲形成网络（PFN）。Cs 为 Pulser 快放电贮能电容，Rp 为充放电电阻，Lp 为充放电电感，D1 为充电回路高压二极管，Ls 为激光器的串联电感（该串联电感有利于提高激光输出脉冲能量[7]）。高压开关 V1、贮能电容 Cs 和激光器组成 Pulser 快放电电路；高压开关 V2、PFN 和激光器组成 Sustainer 放电电路。实验中，两个高压放电开关同时触发导通，Pulser 脉冲放电与 Sustainer 脉冲放电之间的延迟由放电电路元件参数自动形成。

图 1 中，Cp 为预电离火花针串联的耦合电容，该电容采用了一种特别的设计技术，使每个耦合电容的电容量很小[13-14]。在这种激光器中，预电离脉冲放电所需能量很小，只需要很小的 Pulser 快放电贮能电容

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

（在本激光器中，Cs=6nF）就能满足正常放电要求。Cs 小，Pulser 快放电注入能量少，降低了激光输出脉冲中增益开关效应引起的初始尖峰脉冲。

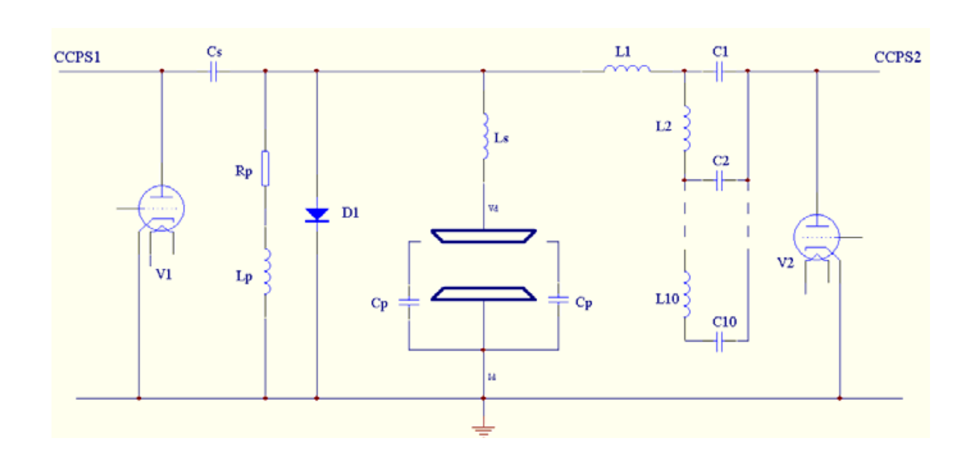


Fig.1 Pulser-sustainer discharge circuit of the laser
图 1 激光器的 Pulse-sustainer 放电电路

2.2 不稳定性管理

长脉冲 TE CO_2 激光器系统在高重复频率下持续运转 30 分钟时，其机械、电学线路、光学光路等的机械不稳定性和热不稳定性是相互关联和相互影响的，都可能影响激光器持续运转的稳定性。

机械不稳定性主要由切向风机高速旋转产生的振动、废热堆积导致的形变等引起。振动可导致紧固件松动，热形变可能导致光学系统失调。

热不稳定性由废热堆积引起。激光器系统发热因素主要有高压放电发热、电路元件发热、激光吸收发热等。长时间高压脉冲放电产生的热积累会引起电路元件烧坏、高压击穿等；激光放电发热造成工作气体温度升高和谐振腔形变，导致激光输出脉冲能量变小、光学模式变坏以及输出功率下降；谐振腔镜片的吸收发热可能会导致镜片形变、甚至损坏。

振动控制与热管理，是影响激光器长时间持续运转的主要因素。

为克服机械不稳定性，采取了加固、减震及消除共振点等措施。在切向风机每分钟 3000 转的高速旋转下，采用精密光学手段对激光器的机械不稳定性进行了多次长时间（每次 1 小时）的持续监测，实验表明发现风机转动引起的机械不稳定性问题得到了良好的控制。

为克服废热堆积引起的谐振腔不稳定，除了采用常规的因瓦合金（殷钢）光桥结构外，还采取了如下措施：将激光全反镜、两个折反镜等三个铜质镜片均固定在大热沉铝板上、ZnSe 输出镜采用强迫风冷、在三根光桥管内通流动循环水等。

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

在电路热管理中，对激励电路中的发热元件如高压闸流管 V1 和 V2、充放电电阻 Rp、充放电电感 Lp、高压二极管 D1 等均采用了强迫风冷。

3 激光输出特性

长脉冲 TE CO_2 激光器在不同的放电脉冲宽度下均能稳定工作[5-6]，因此，在保持 PFN 总电容 100nF 不变的情况下，通过改变 PFN 的电感大小，实验了三种放电脉冲宽度（T_d =14.2us、20.0us 或 24.5us）下激光器的持续运转特性。

激光放电电压波形监测采用美国 Tektronix 公司的 P6015A 型高压探头；放电电流波形监测采用美国 Pearson Electronics 生产的电流探头（Model：Current Monitor 110）；激光脉冲波形由光子牵引探测器记录；激光输出功率采用美国 Coherent 公司生产的 PM5K 型激光功率探头测量并由一台计算机实时记录和存储。

3.1 单脉冲放电特性

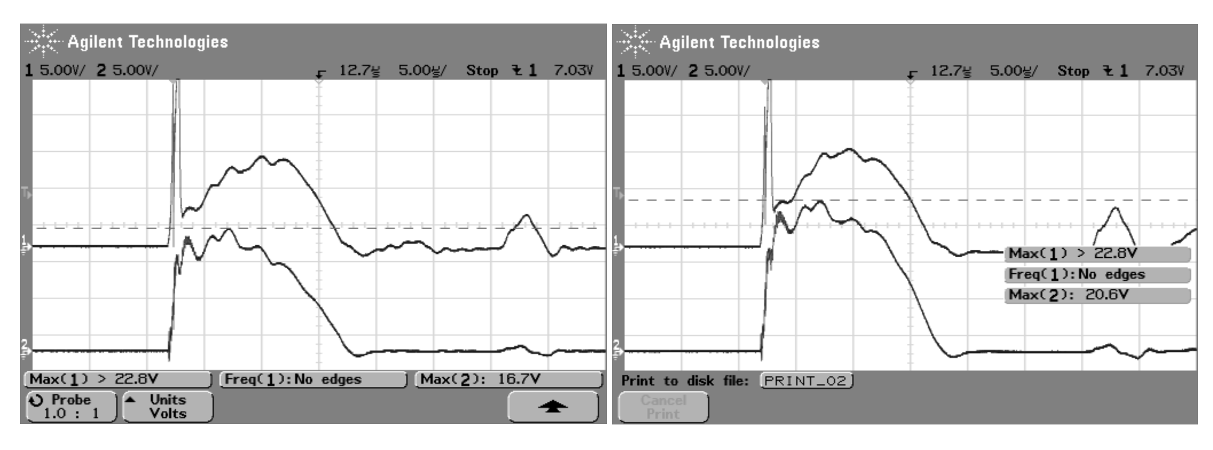
长脉冲 TE CO_2 激光器在三种脉冲宽度下都能稳定放电,其放电电压（或电流）波形基本相同。作为例子，图 2 给出了放电脉冲宽度 14.2us、PFN 充电电压分别为 V_{pfn}=18kV、22kV、28kV 和 32kV 时，激光器放电电压（上）和电流波形（下）。

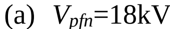
从图 2 可以看出，四个 V_{pfn} 电压下，放电电压波形基本相同，都是一个窄脉冲尖峰紧跟一个宽脉冲隆起。窄脉冲尖峰源于 pulser 放电，宽脉冲隆起主要源自 sustainer 放电。其中，宽脉冲隆起的电压幅度基本不随 V_{pfn} 变化，表现出典型的辉光放电特性[15]。

图 2 中，随着放电电压 V_{pfn} 升高，放电电流随之增高，表明贮存在 PFN 中的能量有效地注入到增益介质中，同时，也展示了激光工作气体的放电阻抗具有随放电电流增大而减小的动态特性。另外，也可以看到，pulser 放电产生的高峰值窄脉冲电压波形，并没有产生相应的高峰值窄脉冲电流波形，相反，其产生的放电脉冲峰值较小，均小于 sustainer 放电脉冲峰值。

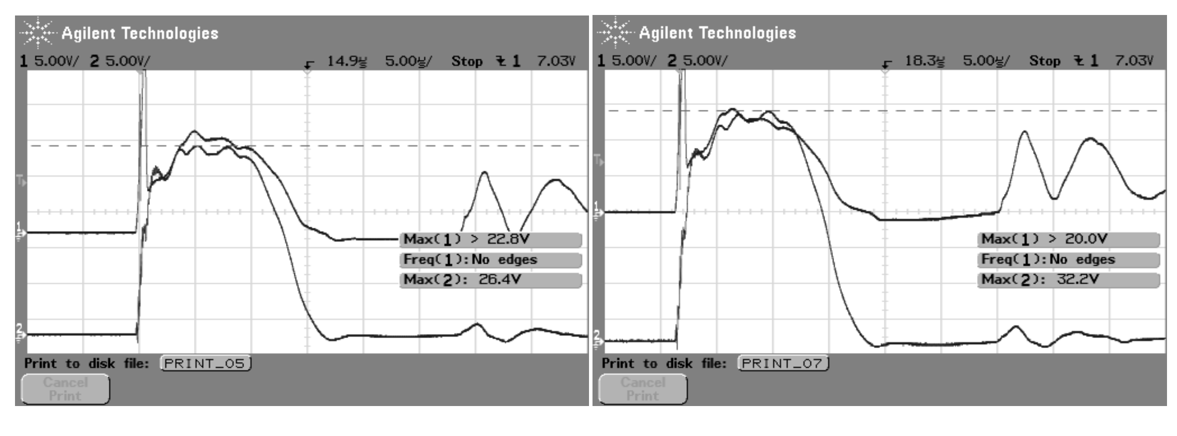
从图 2 的电压波形还可以看出，在 sustainer 主放电结束后一段时间后，还会产生一个小扰动脉冲。随着 sustainer 充电电压 V_{pfn} 升高，主放电注入能量增大，这个扰动脉冲的幅度也变大。这表明 sustainer 主放电结束后，激光工作气体需要较长的消电离恢复时间。sustainer 放电高压越高、注入能量越大，消电离回事时间越长，高重复频率放电更加不稳定。

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn





(a) V_{pfn}=18kV　　　(b) V_{pfn}=22kV



(c) V_{pfn}=28kV　　　(d) V_{pfn}=32kV

Fig. 2 Laser discharge voltage/current waveforms at T_d =14.2us

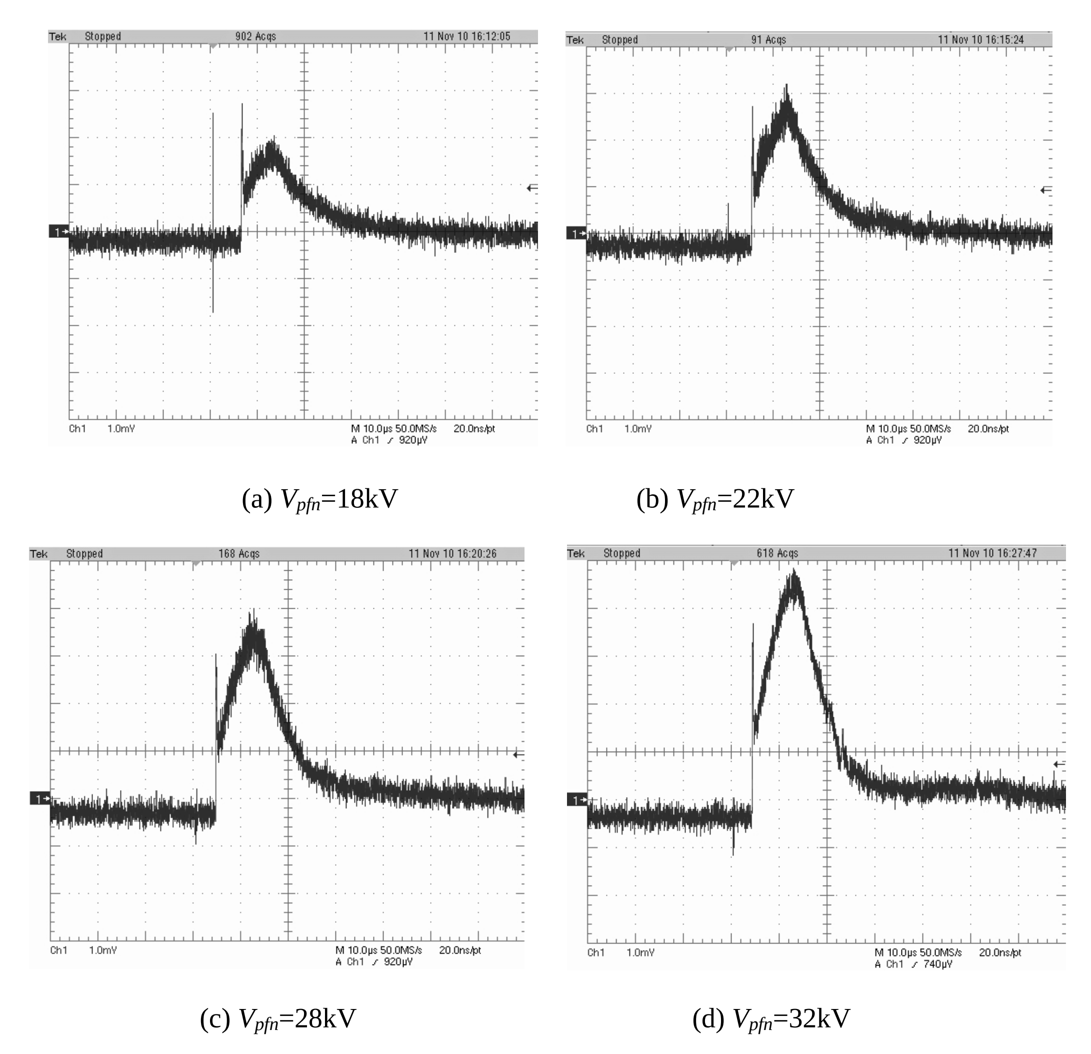
(Upper: Discharge voltage; Lower: Discharge current)

图 2 T_d =14.2us 时激光放电电压/电流波形（上：电压；下：电流）

3.2 单脉冲激光输出特性

图 3 给出了图 2 情况下光子牵引探测器测量得到的激光脉冲波形。在四个 V_{pfn} 电压下，激光脉冲波形形状基本相同，都由一个增益开关效应引起的初始尖峰脉冲加上一个长脉冲组成，其中，初始尖峰激光脉冲能量在整个激光脉冲能量中的占比很小。从图 3(a)到(d)，随着 sustainer 放电注入能量增大，sustainer 放电产生的长脉冲激光输出能量越大，其峰值功率甚至超过初始尖峰脉冲的峰值功率。计算可知，在图 3(d)中，Pulser 放电能量只占整个放电能量的 5%，考虑到 pulser 放电能量主要消耗在预电离放电中，此时，增益开关效应引起的初始尖峰脉冲占整个激光脉冲能量的份额远小于 5%。

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO_2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨，　Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn



(a) V_{pfn}=18kV　　(b) V_{pfn}=22kV

(c) V_{pfn}=28kV　　(d) V_{pfn}=32kV

Fig.3 Laser pulse profiles at T_d =14.2us

图 3 T_d =14.2us 时激光脉冲波形

图 4 进一步给出了三个放电脉冲宽度下激光输出脉冲能量随 V_{pfn} 电压的变化关系。可以看出，同一个脉冲宽度下，激光输出脉冲能量随 V_{pfn} 升高而近似线性增加。有意思的是，虽然 sustainer 中贮存的电能与 V_{pfn} 电压是平方关系，但是，激光输出脉冲能量与 V_{pfn} 电压却是近似线性关系。这是因为这种激光器的辉光放电阻抗随 V_{pfn} 电压升高而近似线性下降，激光输出能量主要与辉光放电电流有关。另外，图 4 中，同样 sustainer 放电注入能量下（即相同的 V_{pfn}），激光输出脉冲能量随脉冲宽度增加而下降，这也是因为同样注入能量下，放电脉冲宽度变宽，放电电流变小，激光输出脉冲能量随之下降。

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO_2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

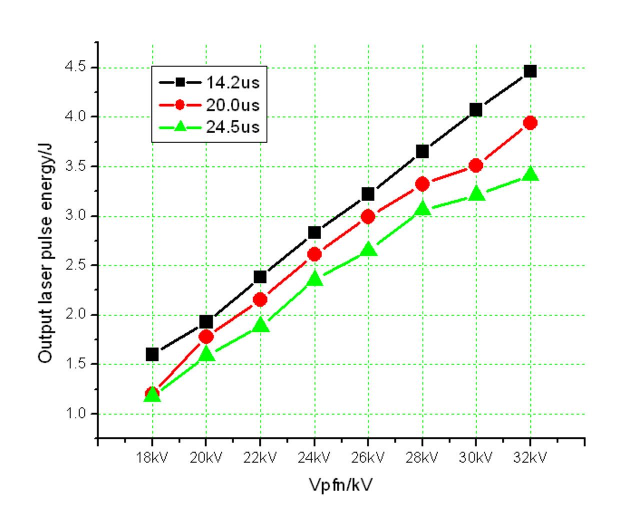


Fig. 4 Laser pulse energies versus V_{pfn}

图 4 激光脉冲能量随 V_{pfn} 的变化曲线

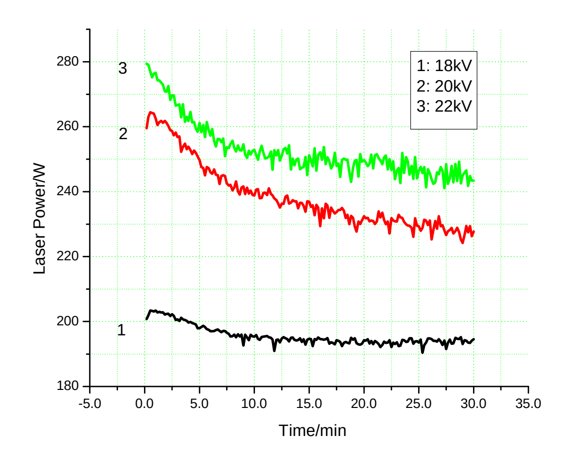
3.3 长时间持续运转特性

长脉冲 TE CO_2 激光器在单脉冲运转时，在较高的 V_{pfn} 下都能够获得稳定的长脉冲辉光放电，但是，由图 2 可见，高 V_{pfn} 电压放电时，激光工作气体消电离时间长，在重复频率运转会有相当频繁的不稳定弧光放电。弧光放电破坏了辉光放电的稳定性，使放电能量不能有效注入激光工作气体产生激光输出，因此，观察激光器高重复频率放电持续运转特性时，sustainer 充电电压 V_{pfn} 设置在 18~22kV 范围。

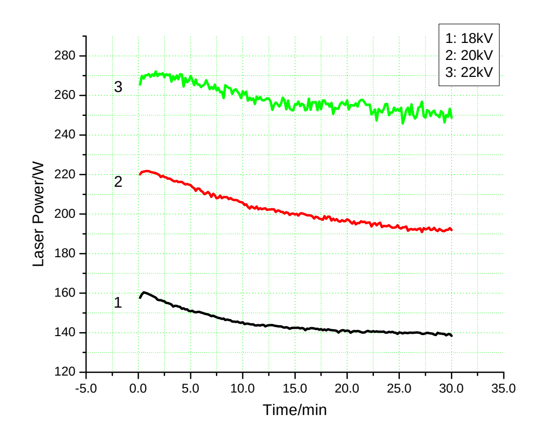
图 5 为三个放电脉冲宽度下 V_{pfn} 分别为 18kV、20kV 和 22kV 时，激光器输出平均功率随时间变化的曲线。可见，三个脉冲宽度放电下，激光器以 100Hz 高重复频率工作，均能持续稳定运转 30 分钟。图 5(a)中，放电脉冲宽度为 T_d =14.2us，V_{pfn}=20kV 和 22kV 时，激光器持续工作 30 分钟后，输出平均功率仍然超过 220W；曲线上细小起伏主要是由放电起弧导致输出脉冲能量变化引起。图 5(b)中，放电脉冲宽度为 T_d =20.0us，V_{pfn}= 22kV 时，激光器持续工作 30 分钟，输出平均功率仍然有近 250W；与图 5(a)中 V_{pfn}=22kV 对应的曲线相比，图 5(b)曲线上细小放电起弧明显减少，表明此脉冲下，放电要相对稳定。图 5(c)中，放电脉冲宽度为 T_d =24.5us，V_{pfn}=20kV 和 22kV 时，激光器持续工作 30 分钟，输出平均功率仍然超过 200W；该脉冲宽度和重复频率下，与图 5(b)相比，V_{pfn}=18kV 和 20kV 时，激光输出功率较为稳定。

从图 5 可以看出，100Hz 重复频率、V_{pfn}= 18kV 时，三种脉冲宽度放电下，激光器运转都相当稳定，起弧较少。尤其是在放电脉冲宽度 T_d =24.5us 时，激光输出平均功率在 30 分钟的持续运转时间内，V_{pfn}= 20kV 时，激光输出平均功率从 218.7W 下降至 205.3W，仅下降了 6.1%；V_{pfn}= 18kV 时，激光输出平均功率下降在 2%以内。

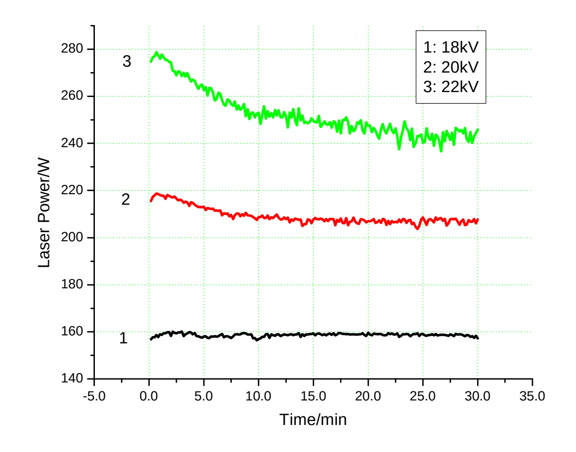
*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn



(a) T_d =14.2us



(b) T_d =20.0us



(c) T_d =24.5us

Fig. 5 Average laser power versus time at 100Hz HRR

图 5 100Hz 高重复频率下平均激光功率随时间的变化曲线

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）

卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com

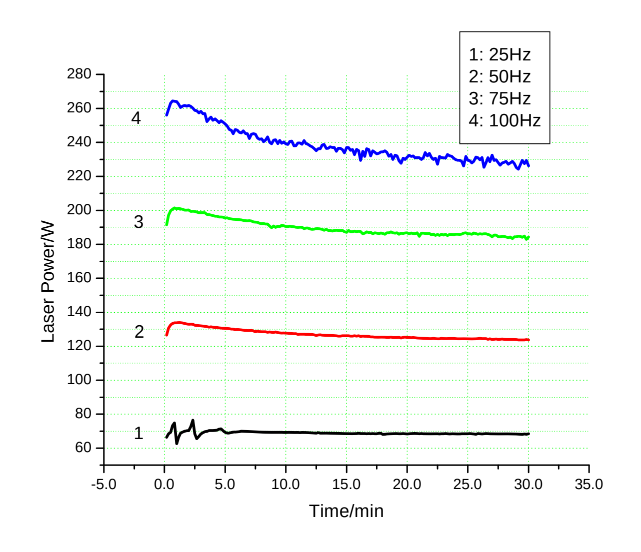
通信联系人：吴谨，　Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

图 6 为 V_{pfn}=20kV、重复频率分别为 25Hz、50Hz、75Hz 和 100Hz 时，长达 30 分钟内激光器输出平均功率变化曲线。可以看到，在不同的放电脉冲宽度下，不同的脉冲重复频率，激光器均能持续运转 30 分钟；重复频率越高，注入能量越大，激光平均功率下降较大，在持续 20 分钟后，激光器输出平均功率基本稳定。在 V_{pfn}=20kV 下，随着脉冲重复频率的升高，激光平均功率随时间变化曲线越不光滑，随运转持续时间增加而下降越明显。这个实验结果与图 2 中单脉冲放电特性的观察结果一致。由于长脉冲放电时，激光工作气体的消电离恢复时间较长，未能完全消电离的工作气体放电更加容易不稳定，因此，重复频率越高，放电不稳定的概率增加。频繁起弧放电，导致激光输出脉冲能量波动，输出压降也越大。从图 6 也可以看出，在 V_{pfn}=20kV 下时，实验的四个脉冲重复频率中，25Hz、50Hz 和 75Hz 下激光器输出功率稳定，30 分钟运转平均功率下降不超过 10%。

表 1 给出了 100Hz 脉冲重复频率下， 30 分钟持续工作，激光器输出平均功率下降的百分比数据。可以看到，在三个脉冲宽度、三个 PFN 充电电压下，输出平均功率的下降均在 15%以内。

Table 1 Decreased percentage of average laser power at 100Hz HRR

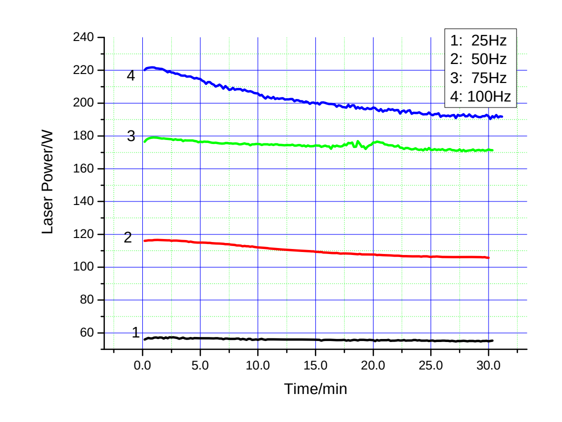
	Decreased Percentage (%)		
	18kV	20kV	22kV
14.2us	5.0	14.4	13.0
20.0us	13.1	13.2	8.1
24.5us	1.6	5.5	13.0



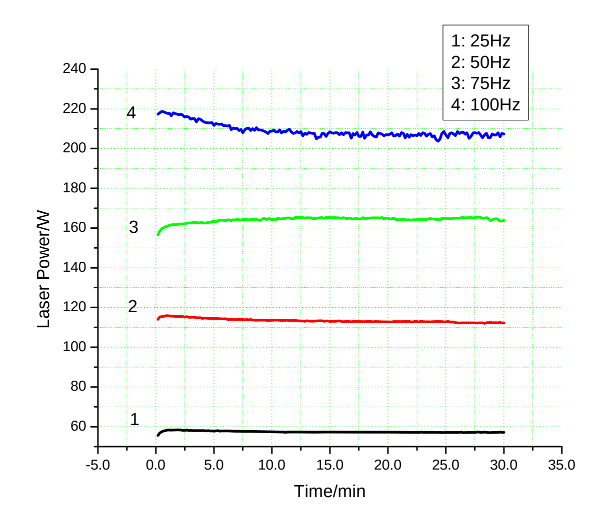
(a) T_d =14.2us

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）

卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn



（b）T_d =20.0us



（c）T_d =24.5us

Fig. 6　Average laser power versus time at V_{pfn}=20kV

图 6 V_{pfn}= 20kV 时平均激光功率随时间的变化曲线

4. 讨论

由图 2 和图 3 的激光单脉冲输出特性可知，这种长脉冲 TE CO_2 激光器，通过改变 Pulser-sustainer 电路的参数（主要是 sustainer 中 PFN 网络的电感数值），即可以实现对输出脉冲宽度的调控。这是不同于常规 TEA CO_2 激光器的特性。常规 TEA CO_2 激光器要求放电时间远小于辉光放电向弧光放电的转换时间，只能采用低感快脉冲激励电路，因此，对其激光脉冲宽度的调控，一般采用改变激光工作气体（如增加 N_2 含量、降低工作气压等）实现。然而，由于常规 TEA CO_2 激光器放电时间非常短，通过改变工作气体只能在很有限的范围内改变激光脉冲长度，整个激光脉冲波形总是一个高峰值功率的窄尖峰脉冲加上一个长拖尾，尖峰脉冲宽度（FWHM）约为 30～200ns，占整个激光脉冲能量的 30%～50%，拖尾长度一般为 1～10μs[12]。但是，在这种长脉冲 TE CO_2 激光器中，通过 Pulser-sustainer 放电技术，可以在不改变激光工作气体配比的条件下，大幅度地调控激光输出脉冲波形宽度，实现大能量长脉冲运转。

由图 5 的数据可进一步计算得到输出激光脉冲平均功率随时间变化的曲线，如图 7 所示。可见，V_{pfn}=22kV

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)， 男， 广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

下，30 分钟持续工作后，放电脉冲宽度 T_d=14.2us 时，激光平均功率约 245W，脉冲功率约 170kW，两者之比约 1:694；放电脉冲宽度 T_d =20.0us 时，激光平均功率约 250W，脉冲功率约 125kW，两者之比约 1:500；放电脉冲宽度 T_d=24.5us 时，激光平均功率约 243W，脉冲功率约 100kW，两者之比约 1:412。在约 20us 脉冲宽度下，脉冲功率为平均功率的约 500 倍，这在常规 TEA CO_2 激光器或调制连续波 CO_2 激光器中，都是不容易实现的。这种长脉冲 TE CO_2 激光器，具备同时兼顾脉冲能量、脉冲宽度、脉冲功率、平均功率等多个重要光学参数的运转能力。

图 6 的数据表明，这种长脉冲 TE CO_2 激光器具备良好的长时间工作能力。由于采用了 Pulser-sustainer 技术，pulser 放电电压高，注入能量小，不产生弧光放电；sustainer 放电电压低，注入能量大，sustainer 电路中的电感抑制了放电电流的快速增长，泵浦能量的注入是相对缓慢的，不易产生大起弧电流，即使有弧光放电产生，也不会产生雪崩似增长，对后续脉冲放电影响有限。在图 5 和图 6 中，激光平均功率曲线上细小波动，主要是弧光放电导致的激光输出不稳定，但是，这种不稳定没有导致运转的不持续。另外，在这种激光器中，高电压 pulser 放电仅注入很小一部分能量，对激光工作气体的电离、分解较小，有利于激光器的长时间持续运转。因此，虽然，激光工作气体仅采用了气体催化剂（CO、H_2），但是，长达 30 分钟的持续运转后，激光器输出功率仍不低于最高值的 80%。由此，可以合理推论，如果采用固体催化剂，这种长脉冲 TE CO_2 激光器应该能够在保持稳定输出的条件下支持更长时间的连续运转。

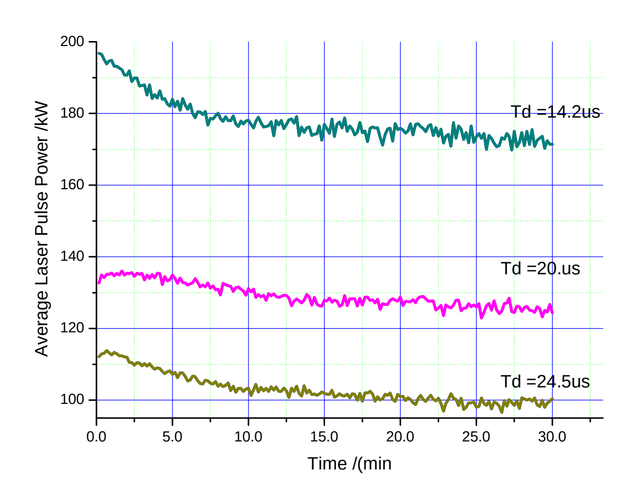


Fig. 7 Average laser pulse power versus time at V_{pfn}=22kV and 100Hz HRR

图 7 V_{pfn}=22kV、100Hz HRR 下平均激光脉冲功率随时间的变化曲线

5. 结论

实验研究了一台 1.17L 放电体积的长脉冲 TE CO_2 激光器的持续运转特性。在不采用固体催化剂的条件下，激光器均连续稳定运转了 30 分钟，获得了激光器在三种不同放电脉冲宽度、不同注入能量、不同脉冲重复频率下的详细实验数据。结果表明，这种长脉冲 TE CO_2 激光器，在 100Hz 脉冲重复频率下，连续工作 30 分钟，其输出激光平均功率下降小于 15%。

文献资料中，关于这种长脉冲 TE CO_2 激光器长时间运转的研究报道还非常少。我们首次提供了这种长

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

脉冲 TE CO_2 激光器长达 30 分钟连续工作的详细实验数据，演示了其良好的持续运转能力，丰富了其输出特性数据库，为相关应用提供了定量参考。

基于 Pulser-sustainer 技术的紫外预电离长脉冲 TE CO_2 激光器，具备同时兼顾脉冲能量、脉冲宽度、脉冲功率、平均功率等多个重要光学参数的输出能力，除在激光加工方面的应用外，在激光医学[16]等方面有一定的应用潜力。另外，随着 9-12um 波段量子级联激光器的发展[17-18]，长脉冲 TE CO_2 激光器作为功率放大器，还可实现更多的应用。

参考文献：

[1] Christian Weingarten, Emrah Uluz, Andreas Schmickler Karsten Braun, Edgar Willenborg, Andre Temmler and Sebastian Heidrich, Glass processing with pulsed CO_2 laser radiation[J], Appl. Opt. 2017, 56(4):777-83

[2] B. J. Meyer, G. Staupendahl, F. A. Müller, and S. Gräf, Sensitive ablation of brittle materials with pulsed CO_2 laser radiation[J], J. Laser Appl. 2016,28:012002.

[3] K. L. Wlodarczyk, N. J. Weston, M. Ardron, and D. P. Hand, Direct CO_2 laser-based generation of holographic structures on the surface of glass[J], Opt. Mater. Express 2016, 24:1447–1462

[4] G. Staupendahl, A novel Q-switched CO_2 laser and its applications[J], Laser Tech. J. 2014,11:22–25

[5] 张昭，吴谨，王东蕾，刘世明，唐永新，谭荣清，张阔海，万重怡,长脉冲紫外预电离 TE CO_2 激光器[J], 中国激光 2005, 32(12):1599-1604.（Zhang Zhao, Wu Jin, Wang Donglei, Liu Shiming, Tang Yongxin, Tan Rongqing, Zhang Kuohai and Wan Chongyi, Long pulse TE CO_2 laser with UV-preionization [J], Chin. J. Lasers 2005, 32(6):739-742）

[6] Jin Wu, Zhao Zhang, Donglei Wang, Shiming Liu, Tang Yongxin, Tan Rongqing, Kuohai Zhang, Chongyi Wan, Novel long pulse TE CO_2 laser excited by pulser-sustainer discharge [J], Optics & Laser Technology 2007, 39(4):701-704

[7] 汪训忠，吴谨，王东蕾，卢远添，刘世明，王云飞，采用新型激励方式的长脉冲TE CO_2激光器[J], 光电子•激光 2008,19(6):746~750.（Wang Xunzhong, Wu Jin, Wang Donglei, Lu Yuantian, Liu Shiming, Wang Yunfei. Long pulse TE CO_2 laser with a novel excitation scheme[J], J. Optoelectronics•Laser 2008, 19(6):746~750）

[8] 吴谨，王东蕾，刘世明，唐永新，基于 Pulser/sustainer 技术的高重复频率长脉冲紫外预电离 TE CO_2 激光器[J], 中国激光 2009, 36(5): 1062-1067. (Wu Jin, Wang Donglei, Liu Shiming, Tang Yongxin, Performance investigation on repetition–rate long pulse UV-preionized TE CO_2 laser ultilizing Pulser/sustainer technique [J], Chin. J. Lasers, 2009, 36(5):1062-1067)

[9] 王云飞，吴谨，刘世明，汪训忠，王东蕾，张阔海，卢远添，基于Pulser/sustainer技术的可调谐长脉冲TE CO_2激光器[J], 中国激光 2007, 34(9):1185-1189. (Wang Yunfei, Wu Jin, Liu Shiming, Wang Xunzhong, Wang Donglei, Zhang Kuohai, Lu Yuantian, Tunable long pulse TE CO_2 laser with Pulser/sustainer excitation [J], Chin. J. Lasers 2007, 34(9):1185-1189)

[10] 卢远添，吴谨，王东蕾，刘世明，柯常军，万重怡，谭荣清，大能量长脉冲 TE CO_2 激光器[J], 强激光

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）

卢远添(1982—)，男，广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn

与粒子束 2008, 20(9):1437-1440. (Lu Yuantian, Wu Jin, Wang Donglei, Liu Shiming, Ke Changjun, Wan Chongyi, Tang Rongqing, Long pulse TE CO2 laser with high energy [J], High Power Laser and Particle Beams 2008, 20(9):1437-1440)

[11] 吴谨，卢远添，王东蕾，刘世明，张阔海, 1.5kW 新型长脉冲 TE CO_2 激光器[J],中国激光，2010,37(7):1697-1703. (Wu Jin, Lu Yuantian, Wang Donglei, Liu Shiming, Zhang Kuohai, Novel long pulse TE CO2 laser with 1.5kW average output power [J]. Chin. J. Lasers, 2010, 37(7):1697-1703)

[12] 吴谨, 紫外预电离长脉冲 TE CO_2 激光器[J], 激光与光电子进展 2009, 46(2):43-45. (Wu Jin, Novel long pulse TE CO_2 laser [J], Laser & Optoelectronics Progress 2009, 46(2):43-45)

[13] 程亮，万重怡，周锦文，王东蕾，吴谨，谭荣清，印刷电路板预电离小型TEA CO_2激光器[J],中国激光 2002,29(1):7-9. (Cheng Liang, Wan Chongyi, Zhou Jinwen, Wang Donglei, Wu Jin, Tan Rongqing, A mini TEA CO_2 laser using printed circuit board preionization[J], Chin. J. Lasers 2002, 29(1):7-9)

[14] Jin Wu, Donglei Wang, Chongyi Wan, Shiming Liu, Effective way to minimize the initial spike energy in a pulsed TE CO_2 laser [J], Opt. Eng. 2009, 48(1):014201

[15] L. J. Denes and J. J. Lowke, V-I characteristics of pulsed CO_2 laser discharges [J], Appl. Phys. Lett. 1973, 3(1):130-132

[16] D. Fried, M. J. Zuerlein, C. Q. Le, and J. Featherstone, Thermal and chemical modification of dentin by 9-11um CO_2 laser pulses of 5-100us duration [J], Lasers Surg. Med. 2002，31(4)：275-282

[17] http://www.cascade-technologies.com/

[18] K. M. Nowak, T. Ohta, T. Suganuma, T. Ykotsuka, J. Fujimoto, H. Mizoguchi, A. Endo, Spectral characteristics of quantum-cascade laser operating at 10.6um wavelength[J], Opt. Lett. 2012, 37,4765-67

*本项目由国家自然科学基金资助（批准号：61475157，60678019）
卢远添(1982—), 男, 广西人,硕士,助理研究员，主要从事磁探测技术、长脉冲 CO2 激光器等研究；Email：louty15@gmail.com
通信联系人：吴谨， Email：jwu909@263.net；jwu@mail.ie.ac.cn